

令和 5 年 6 月 25 日現在

機関番号：20106

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K05049

研究課題名（和文）災害・停電時におけるAI連携型リアルタイム社会インフラ管理システムの研究

研究課題名（英文）AI-powered real-time infrastructure management system at the time of disaster and blackout

研究代表者

江口 真史（Eguchi, Masashi）

公立千歳科学技術大学・理工学部・教授

研究者番号：40232946

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、近年頻発する台風・地震等の災害時における電柱等社会インフラの倒壊情報をリアルタイムに取得する技術の開発を目的として、必要な要素技術の検討・開発、システム化の検討を行った。具体的には、IoTセンサ型の場合に対しては、有効なセンサの検証・選定、および多機能IoTセンサデバイスの試作・動作検証、および振動伝搬数値シミュレーションなどを行った。光ファイバ型の場合に対しては、POF伝搬光の性質の把握し、およびPOF伝送で必要となるPOFスターカプラ設計のための基礎的知見を得るために数値シミュレーションを行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年頻発する自然災害時における電柱等社会インフラの倒壊情報をリアルタイムに取得する技術の開発を目指した要素技術の検討を行った。本研究成果は、電柱の挙動が各種センサの応答をもとに詳細に分析されている点、およびPOF伝搬光の変動が明らかにされている点に学術的意義がある。また、できるだけ既存技術の組み合わせで多機能IoTセンサデバイスを低コストで実現できる可能性を示した点に社会的意義がある。

研究成果の概要（英文）：The aim of this project is to develop AI-powered real-time infrastructure management system at the time of disaster and blackout. We address here detection technologies of collapsed utility poles. Specifically, in IoT sensor types, effective sensors are selected and validated. In addition, a multifunctional IoT device is prototyped and verified, and vibration propagations is also investigated by numerical simulations. In optical fiber sensor types, numerical simulations are applied to understand the behavior of propagating lights in POFs and to obtain the fundamental knowledge needed for the design of POF star-couplers.

研究分野：通信ネットワーク工学

キーワード：社会インフラ管理 IoTセンサ 光ファイバケーブル 自然災害 災害復旧

## 1. 研究開始当初の背景

現在、災害時における人命救助に向かう緊急車両通行可否等各種行動判断に向け、道路、電柱等社会インフラ設備の倒壊・損傷情報をリアルタイム・高精度に取得する技術が必要とされている。平時の社会インフラの状態把握に向けては、普及・拡大が進む IoT センサ情報を利用する等、様々な技術が研究開発されている。しかし、災害時・停電時のような IoT センサデバイス等への電力給電不可時での社会インフラ管理技術についてはほとんど検討されていない状況である。一方、環境負荷低減・維持管理コスト縮減という観点から自然エネルギーを有効利用したエナジーハーベスティング技術の研究、マイクロプロセッサを含めた各種センサデバイスの低消費電力化技術および利用拡大に向けた小型・低コスト化が進展しており、電力給電が困難な状況においても動作可能なシステムを構築可能にする要素技術の開発が日々進んでいる。今後、システム投資・維持管理コストという観点からも、災害時のみならず平時においても電源供給システムを意識せず半永久的動作を可能とする IoT サービス、各種システムの必要性・重要性が一層増大すると考えられる。災害時の迅速な復旧にはこうした情報の正確な把握が必須であり、大規模災害が多発する今日において、そのシステム開発は急務となっている。本研究では、既存の FTTH システム・各種 IoT センサ、送受信モジュール低消費電力化技術、および人工知能技術を含めた各種信号処理技術を利用することで非常時・停電時においても社会インフラの状況をリアルタイムで把握可能な基本技術の確立に向けて研究を開始した。

## 2. 研究の目的

本研究では、以下の3つの問い

(問1) 災害時において光ファイバと局側装置間接続が確保されている場合

- ・既存光アクセスシステムはどこまで利用できるか？
- ・利用可能な IoT センサの種類は？
- ・デバイスへの給電はどうするか？

(問2) 災害時において光ファイバと局側装置間接続が切断された場合

- ・切断瞬間のバースト等の情報は使えないか？

(問3) 光ファイバ伝送特性の変化のみで構造物の状態がどこまで把握できるか？

に対する答えを探求、災害時・停電時のみならず平時においても、社会インフラ設備の状態把握が可能な基本技術の確立を行い、災害時の迅速な初動対応への備え、「安心・安全な社会の実現」への貢献を目的としている。また、本研究における半永久的動作技術はシステム更改周期を延長、結果として社会インフラ維持管理コスト削減、整備・普及期間の短縮化にも貢献できると考えている。

## 3. 研究の方法

IoT センサ型/光ファイバセンサ型のそれぞれの課題に対して、センサデバイスの検討/検証、センサシステムの設計/検証、それぞれに対する問題点の抽出を以下の方法で研究を実施する。

### (1) IoT センサ型

有効なセンサ/デバイスの検証・選定を行い、最適な IoT センサデバイスの開発を進める。具体的には、災害時の電柱倒壊、および平時の車両振動で想定されるセンサ信号の変化と状態検知の分析、さらに AI・データマイニング技術の適用の検討もを行い、状態予測の高精度化の知見を収

集する。

## (2) 光ファイバセンサ型

光ファイバ中の伝搬光の電柱の動き・路面振動による変化に基づいた状況判定システムの実現のために以下の方法で検討を行う。

・超大口径マルチモード光ファイバであるプラスチック光ファイバ (POF) は、各種光ファイバの中でもとりわけ外部擾乱に敏感であるが、超大規模な数値解析が必要なことから、その伝搬光の挙動の分析はこれまであまり明らかにされていない。伝搬光の変化に基づいた状態変化の判定のためには、無外乱下における伝搬光の挙動を知る必要がある。そこで、大規模数値シミュレーションによりその挙動、さらには入射光の入射条件変動による影響の解明を試みる。

・光ファイバセンサシステムの構成には合分配デバイスなどの低コスト/高信頼性光デバイスが必要になるが、POF の場合、超大口径であることに加えて、上記のような伝搬光の不安定性から POF 伝送向けの光デバイスの開発はあまり進んでいない。本研究では、POF 伝送向けの光合分配デバイス (スターカプラ) の開発に対する知見を深めるために、構造の異なる 2 タイプの POF スターカプラの数値シミュレーションを行って最適なデバイスの設計指針の検討材料を探る。

・災害時に光ファイバが切断された場合、切断による光信号の瞬時的な変化 (バーストデータ) が発生することが予想されるが、これを利用した状態変化の可能性および有効性について光ファイバ切断時を想定した数値解析により確認・検証する。

## 4. 研究成果

### (1) IoT センサ型インフラ状況把握システムの開発

本研究では、第一段階として、維持管理/コストなどの面を考慮、図 1 に示す電柱に設置した IoT センサのデータをクラウドサーバで蓄積してデータ解析によりインフラの状況を推定するシステム構成を提案、さらにセンサおよびセンサ設置における要求条件などの検討を行った。電柱倒壊情報 (災害時) /交通量モニタリング

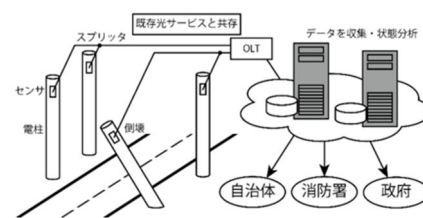


図 1 システム全体構成

(平時) に対する既存 IoT センサの有効性や問題点を明らかにするために、具体的に、加速度センサ、および piezo (圧電) センサの電柱倒壊方向推定、および車両通過検出に対する有効性の検討を行い、IoT センサモジュール開発のための基礎研究を行った。

#### ・ 3 軸加速度センサを利用した電柱倒壊の検出技術

平時の交通量推定に対して、加速度時間波形とスペクトログラムから車両通過時の特徴抽出を試みたが、外部雑音成分が多く、現状車両振動の有意な特徴の抽出はできていない状況である。

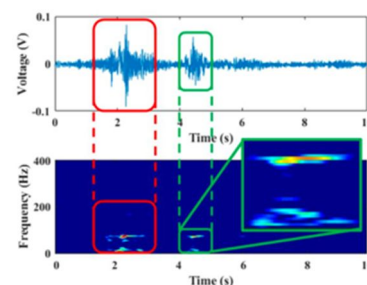


図 2 路上設置時の測定波形

#### ・ piezo センサを利用した交通状況 (車両通過) 判定技術

電柱/路上設置の 2 通りについて、piezo センサの有効性を検証した結果、図 2 に示すように路上設置時のみ車両種類 (緑と赤) による優位な差が観測された。

次に、単純なセンサ出力波形をもとにした通過車両判定の性能限界を打破するために、センサ波形データに対して AI 処理を施して通過車両/歩行者の認識の実現を目指し、その検証を行った。今回の研究では、車両通過/不通過の 2 値、およびそれに歩行者を加えた 3 値データに対して CNN (畳み込みニューラルネットワーク) を適用した AI 解析のテストを行った。その結果、2

値推定に対して 97.8%の精度が得られた。誤認識のケースとしては、通過車両速度が低速のとき/強風時のときに生じていることがわかった。その原因として、学習データの不足が原因の一つと考えている。一方、3 値分類に対しては、誤認識が多く検出された。その一因として、3 値分類ネットワークモデルが適さなかった可能性があると考えている。

災害時の電柱傾斜角推定に対しては、複数のピエゾセンサを組み合わせた IoT デバイスを考案しその有効性を検証した。このデバイスは、災害時は倒壊方向検出を目的とし、平時は傾斜角推定(電柱診断目的)/交通量調査を目的として設計・開発を行った。試作した IoT デバイスは、図 3 に示すように正四面体形状を有し、4 枚の内面それぞれにピエゾセンサを貼り付けて、内部にウェイト(スーパーボール)が入れら

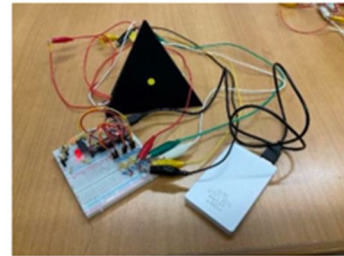


図 3 正四面体 IoT センサ

れた構造になっている。振動に対する各面のセンサの特性を調べるために、センサ設置面から 30cm 離れたところに振動を印加したところ、振動面の方向を向いた面ほどセンサ電圧が大きくなることを確認した。また、内部ウェイトの依存性を調べたところ、内径より少し小さいウェイトサイズが適していることがわかった。また、ウェイトなしでも、面の変形によると思われる振動応答が現れることもわかった。各面のピエゾセンサ出力から計算した傾斜角の予測値の検証を行った結果、センサ電圧の傾斜角依存性が確認され、開発した正四面体 IoT センサにより傾斜角を推定可能であることが確認された。

## (2)数値シミュレーションによる振動伝搬解析

電柱周囲の振動を電柱設置のセンサで検知するためには、平時の周囲振動から伝わる電柱の振動をあらかじめ知っておく必要があり、電柱周辺を振動波源とした電柱への振動伝搬数値解析を行い、波源から電柱への振動

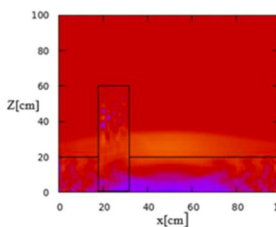


図 4 振動分布(正弦波波源)

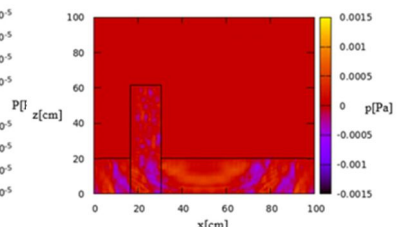


図 5 振動分布(実波形波源)

波の挙動を明らかにした。図 4 から、地表の振動波源からの振動波が地表から電柱・空気に伝わる様子が明らかになった。

上記検討では、正弦波波源を仮定したが、車両通過時の実振動はこれとは大きく異なると予想される。そこで、車両通過時の圧電素子による測定波形を波源波形とした数値シミュレーションを行い、電柱設置センサで観測が予測される波形を求め、振動波形の分析から車両の車種選別の可能性を探った。図 5 からわかるように、正弦波波源と比べて、観測波形波源の振幅が小さいことが起因して空間中の振動が小さくなることがわかった。FFT(高速フーリエ変換)を適用して

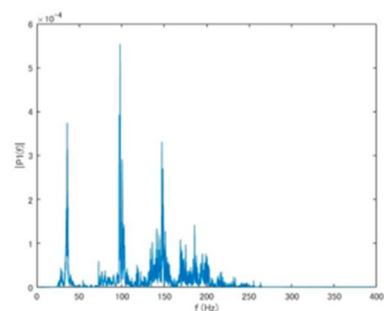


図 6 FFT 解析

周波数解析を行った結果、図 6 に示すように、車種によって異なる周波数ピークが現れることが明らかになった。さらに、振動応答から得られる速度ベクトルを用いた電柱を伝搬する振動の速度分布の車両依存の検討も行ったが、車両による速度ベクトルの分布差に有意な特徴差は認められなかった。

## (3)光ファイバセンサ型インフラ状況把握システムの開発

マルチモード光ファイバ(MMF)をセンサとして利用した場合に用いられる光信号の合分配のための MMF 光スプリッタの開発を目指して、ファイババンドル/矩形の 2 タイプのカプラ構造をもつ POF 向けスターカプラについて、カプラ内の光伝搬の様子を大規模数値シミュレーションにより明らかにした。図 7 は、それぞれ 7x7 バンドル型スターカプラ内の特徴的な光分布の一例を示す。

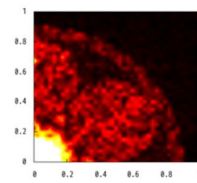


図 7 7x7 バンドル型スターカプラ中の光分布

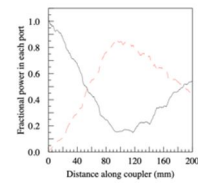


図 8 2x2 矩形スターカプラのパワー移行

入射ポートから他ポートへのパワーの移行のメカニズムが明らかになった。2x2 矩形スターカプラの解析においては、ポート間の周期的なパワー移行が観測され、パワースプリッタの設計が可能であることを確認した(図 8、実線：入射ポート、波線：他のポート)。

MMF 中の伝搬光は外部擾乱に非常に敏感であることから、電柱の挙動のセンシングに有望と考えられるが、その一方で伝搬光の振る舞いはとても複雑なため、その伝送特性を使ったセンシング、あるいは伝送システムで必要とされる光デバイス設計のためには、まずその伝搬光の挙動を知る必要がある。そこで、MMF 光伝搬の様子、および入射波依存性を大規模数値シミュレーションにより解明した。その結果、入射波が干渉しながら複雑な変動を伴って伝搬する様子、およびその特徴の一部が明らかになった。図 9 に示すように、MMF 中の伝搬光は複雑に変動しながら伝搬するが、伝搬パワーは比較的にコア中央付近に分布していることがわかった。

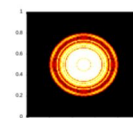


図 9 MMF 伝搬光の光分布

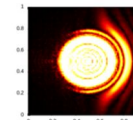


図 10 MMF 伝搬光の光分布 (軸ずれ入射)

入射波の軸ずれの影響については、図 10 からわかるように、軸ずれ側のファイバ外のパワーがクラッド外部で切り離されて放射していく様子が明らかになった。ファイバ内分布については、非対称入射により左右に分布がぶれながら伝搬していく様子、および軸ずれがない入射の場合と同様に、ファイバ内パワーの大部分がコア中央付近に分布して伝搬することが確認された。続いて、電柱倒壊による断線時の戻り

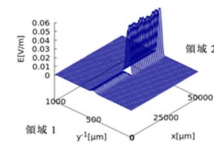


図 11 導波路空隙(中央部)による戻り光(手前)の様子

光の様子を調べるために、ファイバ間に空隙を設けた光伝搬シミュレーションを 1 次元導波路モデルに対して行い、空隙でのフレネル反射による反射波の戻り光の様子が確認され(図 11) 災害時のファイバ切断による戻り光を使った異常事態の把握の可能性を確認した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計22件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 江口真史
2. 発表標題 POF-光LAN向け2x2矩形スターカプラ内の光伝搬解析
3. 学会等名 電子情報通信学会エレクトロニクスシミュレーション研究会, EST2021-86
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 津野晃大、加古啓晶、木村秀明
2. 発表標題 IoTセンサと振動シミュレーションを組み合わせたインフラ状況把握技術の研究
3. 学会等名 電子情報通信学会エレクトロニクスシミュレーション研究会, EST2021-32
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 西田大輝、佐貴颯治、吉村奈那子、木村秀明
2. 発表標題 システム異常要因・箇所予測技術の研究
3. 学会等名 電子情報通信学会エレクトロニクスシミュレーション研究会, EST2021-33
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 加古啓晶、津野晃大、木村秀明
2. 発表標題 IoTセンサを用いた道路状況把握技術
3. 学会等名 電子情報通信学会エレクトロニクスシミュレーション研究会, EST2021-59
4. 発表年 2022年



1. 発表者名 津野晃大、加古啓晶、木股有輝、木村秀明
2. 発表標題 音場数値シミュレーションによるインフラ状況把握技術
3. 学会等名 電子情報通信学会エレクトロニクスシミュレーション研究会、EST2021-74
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 音代稔、津野晃大、佐貫颯治、木村秀明
2. 発表標題 光ファイバ伝送特性を利用した電柱状態把握技術
3. 学会等名 2022年電子情報通信学会総合大会、B-13-23
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 加古啓晶、津野晃大、木村秀明
2. 発表標題 IoTセンサを用いた道路状況把握技術
3. 学会等名 2022年電子情報通信学会、B-15-10
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 津野晃大、加古啓晶、木村秀明
2. 発表標題 振動センサと数値シミュレーションによるインフラ状況把握技術
3. 学会等名 2022年電子情報通信学会、C-15-3
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 江口真史、木村秀明、小口喜美夫
2. 発表標題 POFスプリッター設計のための数値シミュレーション
3. 学会等名 電子情報通信学会エレクトロニクスシミュレーション研究会、EST2020-66
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山下優、木村秀明
2. 発表標題 振動シミュレーションを用いた電柱倒壊方向推定
3. 学会等名 電子情報通信学会エレクトロニクスシミュレーション研究会、EST2020-67
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 M.Eguchi and K.Oguchi
2. 発表標題 Light Propagation with a huge number of modes in POF
3. 学会等名 Chitose International Forum on Science & Technology 2022, V06 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 K.Oguchi and M.Eguchi
2. 発表標題 Optical wired/wireless networking in home/Local area applications
3. 学会等名 Chitose International Forum on Science & Technology 2022, V07 (国際学会)
4. 発表年 2022年



1. 発表者名 加古啓晶、津野晃大、宮橋一瑠、木村秀明
2. 発表標題 ピエゾセンサを用いた電柱設置型交通量調査システム -車両通過検知技術-
3. 学会等名 2022年電子情報通信学会ソサイエティ大会、B-15-39
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 宮橋一瑠、加古啓晶、木村秀明
2. 発表標題 ピエゾセンサを用いた傾斜角測定技術
3. 学会等名 2022年電子情報通信学会ソサイエティ大会、B-15-8
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 音代柁、津野晃大、佐貫颯治、木村秀明
2. 発表標題 マルチモード光ファイバ特性を利用した電柱状態把握技術
3. 学会等名 2022年電子情報通信学会ソサイエティ大会、B-13-22
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 津野晃大、加古啓晶、木村秀明
2. 発表標題 数値シミュレーションによる振動情報解析
3. 学会等名 2022年電子情報通信学会ソサイエティ大会、A-5-2
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 江口真史、小口喜美夫
2. 発表標題 入射波に対するマルチモード光ファイバ伝搬
3. 学会等名 電子情報通信学会エレクトロニクスシミュレーション研究会、EST2022-80
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 加古啓晶、津野晃大、宮橋一瑠、木村秀明
2. 発表標題 ピエゾセンサを用いた電柱設置型交通量調査システム
3. 学会等名 電子情報通信学会エレクトロニクスシミュレーション研究会、EST2022-89
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 宮橋一瑠、加古啓晶、木村秀明
2. 発表標題 ピエゾセンサを用いた傾斜角測定技術
3. 学会等名 電子情報通信学会エレクトロニクスシミュレーション研究会、EST2022-92
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 加古啓晶、津野晃大、宮橋一瑠、木村秀明
2. 発表標題 ピエゾセンサを用いた電柱設置型交通量調査システム -車両・歩行者分類技術-
3. 学会等名 2023年電子情報通信学会総合大会、B-15-7
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 宮橋一瑠、加古啓晶、木村秀明
2. 発表標題 ピエゾセンサを用いた傾斜角測定技術
3. 学会等名 2023年電子情報通信学会総合大会、B-15-11
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 音代稔、津野晃大、佐貫颯治、木村秀明
2. 発表標題 マルチコア光ファイバ伝送特性を利用した電柱状態把握技術
3. 学会等名 2023年電子情報通信学会総合大会、B-13-23
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	木村 秀明  (Kimura Hideaki)  (10862302)	中部大学・工学部・教授    (33910)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------